

重庆某高速公路危岩崩塌变形特征及治理措施

陈晓刚, 李红卫, 张乾翼

Deformation characteristics and treatment measures of dangerous rock collapse in an expressway in Chongqing

CHEN Xiaogang, LI Hongwei, and ZHANG Qianyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202302010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing

夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 高雪媛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 28-34

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105-112

甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysis on the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48-53

强震区隧道软弱围岩洞口段桩-筏抗震措施的作用效果分析

Analysis on the effect of pile-raft anti-seismic measures for the tunnel section of weak surrounding rock in strong earthquake area

崔光耀, 李鹏宇, 王庆建 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 106-112

基于无人机航测的丹霞地貌区危岩结构面识别与三维裂隙网络模型

Identification of dangerous rock structural planes and fracture network model in Danxia landform based on UAV aerial survey: A case study at simianshan scenic area of Chongqing

熊开治, 任志远, 赵亚龙, 杨忠平, 张黎健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 62-69



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202302010

陈晓刚, 李红卫, 张乾翼. 重庆某高速公路危岩崩塌变形特征及治理措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 43-51.

CHEN Xiaogang, LI Hongwei, ZHANG Qianyi. Deformation characteristics and treatment measures of dangerous rock collapse in an expressway in Chongqing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 43-51.

重庆某高速公路危岩崩塌变形特征及治理措施

陈晓刚, 李红卫, 张乾翼

(中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 文章以沪蓉高速公路 K1515 处五处危岩崩塌为研究对象, 通过勘察、统计和分析查明了危岩崩塌区的工程地质条件和发育变形特征。研究结果表明: (1) W1、W2 危岩体破坏模式为错断和拉裂式, W3-1 危岩体破坏模式为倾倒式, W3-2 危岩体破坏模式为滑移式, W4 和 W5 危岩体破坏模式为鼓胀式; (2) W1、W2 发生拉裂式破坏的稳定性系数分别为 1.12 和 1.61, 处于基本稳定~稳定状态; 在暴雨工况下 W3-1 发生倾倒式破坏的稳定性系数为 0.41, 处于不稳定状态; W3-2 在各工况发生滑移式破坏的稳定性系数均大于 1.35, 处于稳定状态; 在暴雨工况下 W4、W5 发生鼓胀式变形的稳定性系数分别为 1.25 和 1.15, 均处于基本稳定状态; (3) 笔者总结出“降风险、少扰动、稳安全、技术可行”的治理思路, 采用“坡脚岩腔砼挡墙嵌补+局部 SNS 主动网防护+预应力锚索防护”的综合治理措施, 治理效果好。可为该类危岩崩塌治理工程措施提供可靠的参考依据。

关键词: 危岩; 变形特性; 稳定性; 治理思路; 治理措施

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)03-0043-09

Deformation characteristics and treatment measures of dangerous rock collapse in an expressway in Chongqing

CHEN Xiaogang, LI Hongwei, ZHANG Qianyi

(Northwest Research Institute Co. Ltd. of C.R.E.C., Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: In this paper, five dangerous rockfall collapses at K1515 of the Shanghai-Chengdu expressway are taken as the research object. Through investigation, statistics, and analysis, the engineering geological conditions and developmental deformation characteristics of the dangerous rockfall collapse area are clarified. The research results show that: (1) the failure modes of dangerous rock masses W1 and W2 are misbreaking and cracking, the destruction mode of W3-1 dangerous rock mass is dumping, the destruction mode of W3-2 dangerous rock mass is sliding, and the destruction mode of W4 and W5 is bulging; (2) the stability coefficient of W1 and W2 is 1.12 and 1.61 respectively, which are in basically stable~stable state; the stability coefficient of dumping failure of W3-1 is 0.41 and in unstable state; the stability coefficient of sliding failure of W3-2 in W 3-2 is greater than 1.35 and in stable state; under rainstorm condition; the stability coefficient of bulging deformation of W4 and W5 is 1.25 and 1.15 respectively, which are in basically stable state; (3) The authors summarize the governance strategy of “reduce risk, minimize disturbance, ensure safe stability and feasible technology”, and adopt comprehensive remediation measures of “embedding concrete retaining wall at the toe of slope + local active SNS network protection + prestressed anchor protection”, and the treatment effect was good. It can provide reliable reference basis for the treatment measures of dangerous rock collapse.

Keywords: dangerous rock; deformation characteristics; stability; governance ideas; governance measures

收稿日期: 2023-02-10; 修订日期: 2023-09-13

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

第一作者: 陈晓刚(1987—), 男, 汉, 陕西宝鸡人, 本科, 工程师, 主要从事岩土工程相关勘察设计工作。E-mail: 670188130@qq.com.

0 引言

2017年4月28日沪蓉高速公路重庆段K1515+600处坡顶岩壁出现崩塌变形,危岩巨石从高度约165m处跳跃滚落,造成约400m²路基面严重受损,甚至部分落石冲击路面后跳跃砸毁河道浆砌片石护岸,与此同时,残留于高陡岩壁的大量危岩仍具有极大的破坏力,导致沪蓉高速公路重庆段万州至分水段双向断道停运。

因而研究危岩崩塌的发育变形特征、稳定性分析和治理措施极为迫切。学界诸多学者对其也进行了详细总结和研究,如:陈洪凯^[1]从防治角度出发,将危岩的研究成果概括为危岩失稳模式、危岩计算方法和危岩锚固计算方法;胡厚田^[2]依据崩塌形成条件和发生机理的研究分析,总结了崩塌发育的三个阶段和五个模式,根据长期工程实践总结了支撑、拦截、加固等其他措施;王蓉^[3]提出的危岩防治技术措施主要分为主动防治、被动防治和预警措施三种;陈洪凯等^[4-5]分别从危岩的破坏模式对其稳定性进行定量计算。其他一些研究^[6-19]也为危岩崩塌的分类及治理提供充足的理论基础。

本文以沪蓉高速公路重庆段K1515危岩崩塌为具体实例,通过对危岩崩塌的发育、变形特性分析和稳定

性进行计算,总结出“降风险、少扰动、稳安全、技术可行”的治理思路和具体危岩具体治理的综合措施,希冀为同类型高陡危岩崩塌灾害的治理提供参考。

1 危岩区地质背景

1.1 气象、水文条件

危岩崩塌区属亚热带湿润季风性温湿气候,多年平均气温18.1℃,年平均降水量为1262mm,最大日降雨量243.3mm。危岩崩塌陡壁段顺坡向洼槽沟谷发育,沟谷为暴雨性沟谷,强降雨条件下水流发育。

1.2 地形地貌

危岩崩塌区位于铁峰山背斜东南翼与万州宽缓向斜西北翼交界地带,地势上北低南高,坡体上具有上陡下缓的特点。

上部陡坡为厚-巨厚层砂岩构成的基岩陡壁,岩壁高25~30m,坡度70°左右,坡体局部近垂直或呈反坡,受构造裂隙及崩塌变形影响,坡面呈平整与凸凹不平相间形态。

下部缓坡为薄-中厚层砂岩夹泥岩、砂泥岩,相对高差140m左右,坡面受汇水冲刷,横向呈沟谷、洼槽—山梁相间地形,地形起伏较大,平均坡度约30°(图1)。

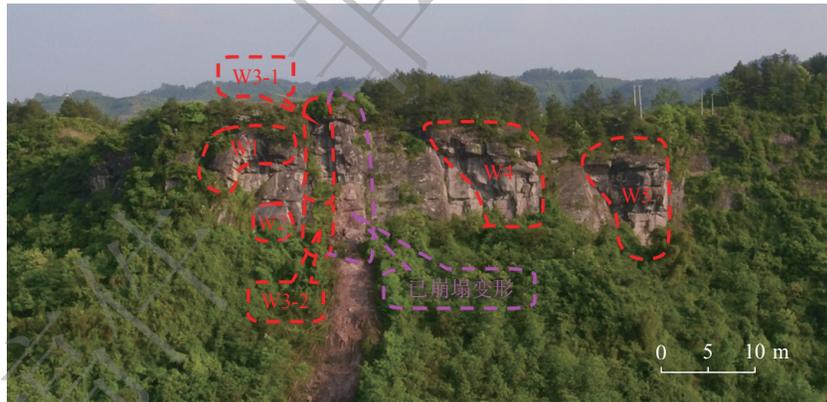


图1 危岩崩塌全貌图

Fig. 1 Panorama overview of dangerous rock collapse

1.3 地层岩性

危岩崩塌区的基岩为侏罗系中统沙溪庙组(J_{2s})砂岩和泥岩。

(1)砂岩:分布于山体顶部基岩陡壁带,危岩崩塌发育的主要物质基础,厚-巨厚层状构造,“X”节理、卸荷裂隙发育。

(2)泥岩:棕红色,泥质结构,薄层状构造,质软,以夹层的形式分布于砂岩、砂岩泥岩中,坡面露头较少。

2 危岩发育变形特征

现状基岩陡壁共发育5处危岩体,如表1所示

(1)W1:立面形状呈“镰刀”型,发育宽度约10m,长度约20m,最外侧结构面控制厚度约3m,整体危岩体体积约600m³,潜在崩塌规模属中型。

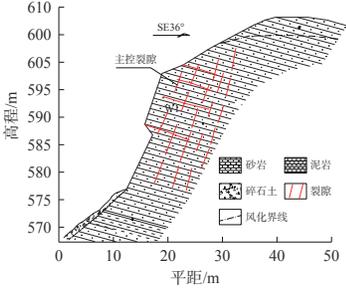
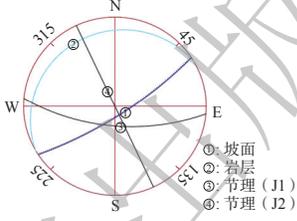
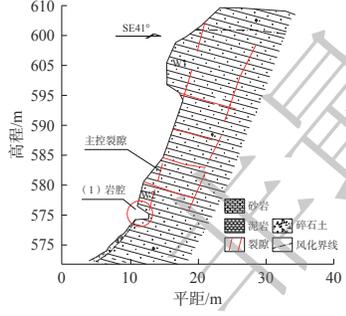
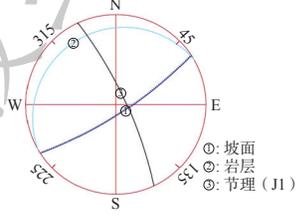
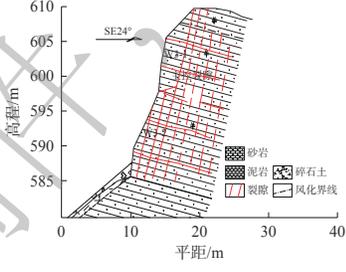
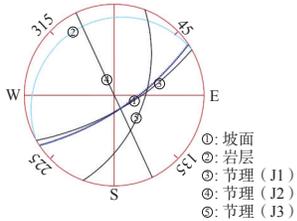
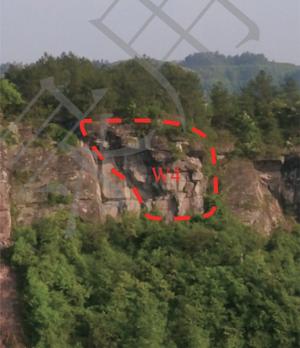
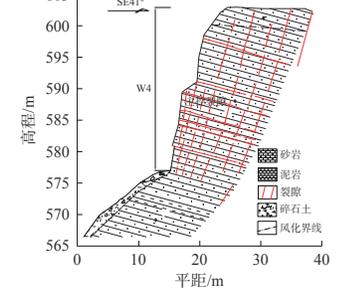
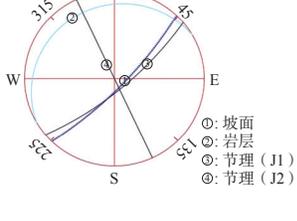
W1岩体以砂岩为主,岩层反倾,产状为NE58°~65°/SE13°~16°,主要发育2组结构面,J1产状NW275°/

NE70°, 为次生扭剪结构面, 闭合状, 延伸较差, 贯通性一般, 间距>1m, J2 产状 NW330°~340°/⊥, 为扭转拉裂隙, 张开量 3~5cm, 面理粗糙, 延伸一般, 贯通性良好, 局部有泥质充填, 间距>1m; 坡面形态起伏不平, 正反坡相间, 产状 NE57°/NW80°。

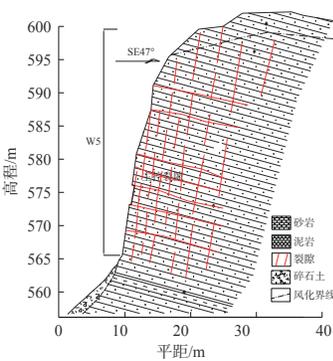
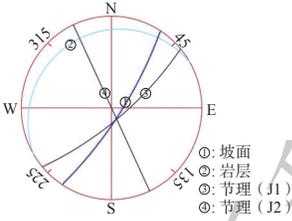
赤平投影分析: J1 倾向与坡面一致, 且倾角略小于坡面, 为一组不利结构面, 在反倾层理面、垂直坡向结构 J2 的共同作用下, 岩体切割呈块状, 易沿结构 J1 产生错断或沿层理面产生拉裂变形, 同时上部岩体呈悬空状, 在结构裂隙影响下, 综合分析 W1 的破坏模式是错

表 1 各危岩体发育变形特征

Table 1 Development and deformation characteristics of dangerous rocks

典型危岩照片	典型剖面图	赤平投影分析	破坏模式	体积/m ³
			拉裂、错断	600
			拉裂、错断	90
			倾倒、滑移	1 260
			鼓胀	2 500

续表 1
Table 1

典型危岩照片	典型剖面图	赤平投影分析	破坏模式	体积/m ³
			鼓胀	4 700

断式和拉裂式。

(2)W2: 位于 W1 危岩体底部岩腔下方, 立面形状呈“椭圆”型, 发育宽度约 5 m, 高度约 7 m, 最外侧结构面控制厚度约 2.5 m, 整体危岩体约 90 m³, 潜在崩塌规模属小型。

W2 以岩体砂岩为主, 岩层反倾, 产状为 NE58°~65°/SE13°~16°, 主要发育 1 组结构面, J1 产状 NW335°/SW80°, 为扭转剪拉裂隙, 张开量 0.5 cm 左右, 面理较平整, 延伸度、贯通性一般, 无充填, 间距>1 m; 坡面形态起伏不平, 产状 NE41°/NW70°。

赤平投影分析: J1 倾向与坡面近垂直, 岩层反倾, 节理裂隙将岩体切割呈块状, 同时上部岩体呈悬空状, 在结构裂隙影响下, 综合分析 W1 的破坏模式是错断式和拉裂式。

(3)W3: 位于崩塌区的东北侧, 立面形状呈“矩形”状, 发育宽度约 7 m, W3 高约 15 m, 背部最外侧结构面控制平均厚度约 4 m, 危岩体约 1 260 m³, 潜在崩塌规模属中型; 危岩中部发育一组顺倾结构面, 将 W3 分为两部分即 W3-1 和 W3-2。W3-1 表面早期崩塌变形作用明显, W3-2 底部因崩塌堆积岩腔。

W3 以岩体砂岩为主, 岩层反倾, 产状为 NE58°~65°/SE13°~16°, 危岩体上主要发育 3 组节理面, J1 产状 NE60°/NW75°, 结构面张开量 5~15 cm, 泥质充填, 向内呈闭合状, 延伸性好, 贯通发育, 面理平整, 间距 0.6~0.8 m, J2 产状 NW330°~340°/⊥, 为扭转拉裂隙, 张开量 3~5 cm, 面理粗糙, 延伸一般, 贯通发育, 局部有泥质充填, 间距>1 m。J3 产状 NE20°/NW60°, 闭合, 延伸、贯通性差, 面理平整; 坡面形态起伏不平, 正反坡相间, 产状 NE56°/NW75°。

赤平投影分析: J1、J3 倾向与坡面基本一致, J1 倾

角与坡面相同, J3 倾角小于坡面, 均为不利结构面, J2 近乎垂直, 裂隙充填泥质, 综合分析在反倾向层理面、垂直坡向结构 J2 的共同作用下, 上部条块状 W3-1 岩体背部裂隙张开, 降雨影响下易沿 J2 产生倾倒变形, 下部 W3-2 岩体易沿 J3 产生滑移变形。

(4)W4: 位于崩塌区的西南侧陡崖, 立面形状呈不规则“梯形”状, 发育宽度约 20 m, 高度 25 m, 下部坡面松弛带厚度约 5 m, 整体危岩体约 2 500 m³, 潜在崩塌规模属中型; 危岩体东北侧坡面由于早期崩塌变形作用形成大规模的岩腔体。

W4 上部岩体以砂岩为主, 岩层反倾, 产状为 NE58°~65°/SE13°~16°, 主要发育 2 组结构面, J1 产状 NE50°/NW78°, 外侧张开量 3~10 cm, 向内呈闭合状, 延伸性好, 贯通发育, 面理平整, 间距 0.6~0.8 m, 向内逐渐增大, J2 产状 NW330°~340°/⊥, 为扭转拉裂隙, 张开量 3~5 cm, 面理粗糙, 延伸一般, 贯通性良好, 间距>1 m; 坡面形态, 起伏不平, 正反坡相间, 产状 NE44°/NW80°。

赤平投影分析: J1 倾向与坡面基本一致, 倾角与坡面相同, 为一组不利结构面。在反倾向层理面、垂直坡向结构 J2 的共同作用下, 岩体多切割呈块状; 同时 W4 底部为 5 m 厚的松弛带, 下部强风化砂岩、泥岩在上部岩体的重压作用下形成的压剪裂隙破碎带, 对上部危岩的支撑能力不足, 综合分析 W4 易发生鼓胀破坏。

(5)W5: 位于崩塌变形体的西南侧陡崖, 立面形状呈不规则“梯形”状, 发育宽度约 20 m, 高度 34 m, 坡面松弛带厚度约 7 m, 整体危岩体约 4 700 m³, 危岩体内及附近结构面较发育, 岩体呈碎裂-块状, 危岩体东北侧坡面由于早期崩塌变形作用形成大规模的岩腔体。

W5 岩体以砂岩为主, 岩层反倾, 产状为 NE58°~65°/SE13°~16°, 危岩体上主要发育 2 组节理面, J1 产

状 NE50°/NW78°, 外侧张开量 3~10 cm, 向内呈闭合状, 延伸性好, 贯通发育, 面理平整, 外部间距 0.6~0.8 m, 向内逐渐增大。J2 产状 NW330°~340°/⊥, 为扭转拉裂隙, 张开量 3~5 cm, 面理粗糙, 延伸一般, 贯通性良好, 间距>1 m; 坡面形态, 起伏不平, 正反坡相间, 产状 NE33°/NW80°。

赤平投影分析: J1 倾向与坡面基本一致, 倾角与坡面相同, 为一组不利结构面。在反倾向层理面、垂直坡向结构 J2 的共同作用下, 岩体多切割呈块状; 同时 W5 底部为 7 m 厚的松弛带, 下部强风化砂岩、泥岩在上部岩体的重压作用下, 不规则压剪裂隙较发育, 岩块间相互嵌套力度较差, 风化较严重, 力学属性较差, 对危岩的支撑能力不足, 综合分析 W5 易发生鼓胀破坏。

3 危岩稳定性分析

3.1 分析方法

根据现场危岩发育特征和崩塌破坏模式分析结果, 采用《工程地质手册》(第五版)中相对应的稳定性评价理论进行本次危岩体的稳定性定量计算。

(1) 倾倒式崩塌

$$K = \frac{W \cdot a}{f \cdot \frac{h_0}{3} + F \cdot \frac{h}{2}} = \frac{6aW}{10h_0^3 + 3Fh} \quad (1)$$

式中: f ——静水压力/kN;

h_0 ——水位高/m, 暴雨时等于岩体高;

h ——岩体高/m;

W ——崩塌体重力/kN;

F ——水平地震力/kN;

a ——转点 A 至重力延长线的垂直距离/m, 为崩塌体宽度的一半。

(2) 错断式崩塌

$$K = \frac{[\tau]}{[\tau_{\max}]} = \frac{4[\tau]}{r(2h-a)} \quad (2)$$

式中: τ ——岩石的允许抗剪强度/kPa;

τ_{\max} ——岩体自重引起的 EC 面上的剪应力/kPa;

a ——岩体宽度/m;

r ——岩体重量/(kN·m⁻³)。

(3) 鼓胀式崩塌

$$K = \frac{A \cdot R_{\text{无}}}{W} \quad (3)$$

式中: A ——危岩与底部软岩的接触面积/m²;

$R_{\text{无}}$ ——危岩底部软岩在天然状态下(雨季为饱水抗压强度)无侧限抗压强度/kPa。

(4) 滑移式崩塌

$$K = \frac{(rV \cos \beta - u - v \sin \beta) \tan \varphi + Ac}{rV \sin \beta + v \cos \beta} \quad (4)$$

式中: V ——岩体体积/m³;

u ——滑移面静水压力/kN;

v ——岩体背部垂直裂隙静水压力/kN;

A ——单位宽度滑移面的面积/m²;

β ——滑移结构面的倾角/(°);

φ ——滑移结构面内摩擦角/(°);

c ——滑移结构面的黏聚力/kPa。

(5) 拉裂式崩塌

$$K = \frac{[\sigma_{\text{拉}}]}{[\sigma_{\text{B拉}}]} = \frac{(h-a)^2 [\sigma_{\text{拉}}]}{3l^2 rh} \quad (5)$$

式中: $[\sigma_{\text{拉}}]$ ——岩石的允许抗拉强度/kPa;

$[\sigma_{\text{B拉}}]$ ——B 点拉应力强度/kPa;

a ——裂缝深度/m;

l ——危岩体厚度/m。

在现场岩体分布特征的勘察基础上, 危岩体稳定性计算参数在参考该地区沿线类似危岩体勘察成果、相关经验值和岩体试验数值来综合确定的(表 2)。

3.2 稳定性计算

根据危岩崩塌稳定性计算公式和岩体经验参数取值, 对 5 处危岩体进行稳定性定量计算, 如表 3—4 所示。(计算说明: ①W1 和 W2 的拉裂破坏中, 计算厚度以岩层厚度为准, 取值为 1 m; ②W3-1 的倾倒破坏中, 静水压力以背部裂隙全部充水为准进行计算; ③W4、W5 的鼓胀破坏中, 需考虑不均匀受压引起的应力集中, 对受力面积进行了折减, 暴雨工况下, 考虑雨水对基座的软化, 岩层的无限抗压强度按极软岩饱水抗压强度等级进行计算。)

稳定性状态的划分评价, 主要参考《工程地质手册》

表 2 岩体参数取值

Table 2 Values of rock mass parameters

名称	风化程度	坚硬程度	完整程度	岩体基本质量等级	天然重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa
砂岩	中风化	较坚硬	较完整	Ⅲ	24.5	1.0	45	40~50	1.2~1.5	2.5~3.5
泥岩	强风化	较软岩-软岩	较破碎-破碎	Ⅳ~Ⅴ	22.5	0.2	27	10~20	0.3~0.6	0.8~1.5

表 3 稳定性计算结果
Table 3 Stability calculation results

编号	尺寸/m			破坏模式	计算工况		稳定性评价	
	高	宽	厚		天然	暴雨	天然	暴雨
W1	10.0	10.0	3.0	错断	8.50	6.86	稳定	稳定
				拉裂	1.65	1.12	稳定	基本稳定
W2	7.0	5.0	2.5	错断	10.20	8.24	稳定	稳定
				拉裂	2.38	1.61	稳定	稳定
W3-1	30.0	7.0	4.0	倾倒		0.41		不稳定
W3-2	15.0	7.0	4.0	滑移	3.00	1.60	稳定	稳定
W4	25.0	20.0	5.0	鼓胀	6.53	1.25	稳定	基本稳定
W5	34.0	20.0	7.0	鼓胀	6.00	1.15	稳定	基本稳定

表 4 稳定性状态划分
Table 4 Classification of stability states

崩塌类型	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
坠落式	$K < 1.0$	$1.0 \leq K < 1.5$	$1.5 \leq K < 1.8$	$K \geq 1.8$
倾倒式	$K < 1.0$	$1.0 \leq K < 1.3$	$1.3 \leq K < 1.5$	$K \geq 1.5$
滑移式	$K < 1.0$	$1.0 \leq K < 1.2$	$1.2 \leq K < 1.3$	$K \geq 1.3$

(第五版)中内容确定。

结果表明, W1、W2 产生错断破坏的可能性小, 主要破坏模式为以岩层厚度为主的拉裂式崩塌变形, W1、W2 在暴雨工况下稳定性系数(K)分别为 1.12 和 1.61, 处于基本稳定-稳定状态; W3-1 在暴雨工况下, 危岩背部裂隙充满水后, 静水压力形成的倾覆力矩将引起危岩的整体倾倒破坏; W3-2 底部发育一顺倾向结构面, 各工况稳定性系数均大于 1.35, 处于稳定状态。W4、W5 鼓胀变形稳定性系数在暴雨工况下分别为 1.25、1.15, 均处于基本稳定状态。

4 危岩防治措施

4.1 治理难点

首先, 基岩岩壁近乎直立, 高差 30 m, 距下方高速公路 200 m 左右, 若采用清方(爆破)形式, 则危石将直接冲击滚落坡面, 极易引发坡面碎屑流等次生病害; 其次, 岩体结构裂隙发育, 清方不但要清除坡面的危岩体, 而且还要放缓后部陡壁, 清方量约 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$, 需增设临时安全措施和征地, 施工困难较大; 最后, 在高速公路边坡顶部进行清方(爆破), 地势差作用下, 落石将以巨大的冲击能冲击公路, 对行车安全影响较大, 不可控因素复杂。

4.2 治理工程措施

依据《工程地质手册》(第五版), 危岩崩塌的治理措施应以根治为原则, 针对中、小型崩塌常见的治理工程措施为遮挡(明洞、棚洞)、拦石墙、拦石网、支撑加固(锚索、锚杆)、镶补勾缝、护面、刷坡和排水等措施。

以往类似危岩工程的治理措施普遍采用“坡面清方(爆破)+锚杆(索)加固+坡面主动网防护”的措施, 此种方法虽可行, 但还存在以下两个问题。

(1)技术方面: 坡面清方(爆破)难度较大, 无法有效避免岩体结构裂隙加剧, 极易引发次生病害, 不利于岩体整体稳定性;

(2)经济方面: 治理费用高, 清方(爆破)费用近 280 万元, 其他安全措施费和征地费用估算约 200 万元。

为有效解决上述危岩治理技术缺憾和治理费用高的问题, 笔者结合具体 K1515 危岩体的破坏模式和治理措施对比, 总结出“降风险、少扰动、稳安全、技术可行”的治理思路, 针对危岩采用了“坡脚岩腔砼挡墙嵌补+局部 SNS 主动网防护+预应力锚索防护”的综合治理措施, 可以有效避免对危岩裂隙的扰动和影响, 杜绝次生灾害的发生, 对危岩整体稳定性有利, 其治理费用约 360 万元, 充分保证其治理过程中的安全性和经济性(图 2)。

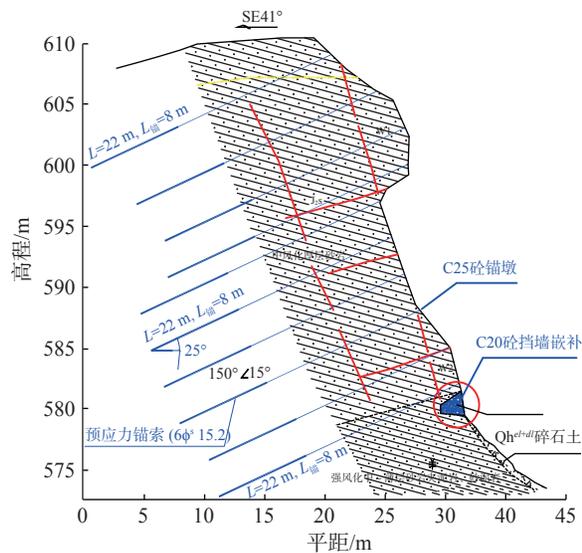


图 2 危岩治理工程断面图

Fig. 2 Cross-section of dangerous rock remediation project

(1) C20 砼挡墙嵌补

于危岩体陡壁脚部空岩腔 C20 砼挡墙进行嵌补。对(1)号岩腔, 挡墙厚度 2 m, 墙高 1~2 m, 长度 15 m。对(2)号岩腔外侧设置 C20 砼支顶墙, 顶宽 2 m, 墙高 3~4 m, 胸坡 1:0.3, 背坡垂直。

(2) 主动防护网

于边坡顶部 W4、W5 危岩体病害范围内采用 SNS 主动网进行防护, 面积约 1 800 m²。

(3) 预应力锚索

于坡顶危岩体范围设置预应力锚索, 锚索长度均为 22 m, 锚索纵横向间距 3~4.5 m, 锚索倾角 25°, 钻孔直径为 130 mm, 锚固段长度均为 8 m, 锚索由 6 根一束 $\Phi^{15.2}$ mm 高强度、低松弛的 1860 级钢绞线组成。反力端采用锚墩, 锚墩截面尺寸 0.6 m×0.6 m, 厚度 0.6 m, 采用 C25 钢筋砼现浇(图 3)。

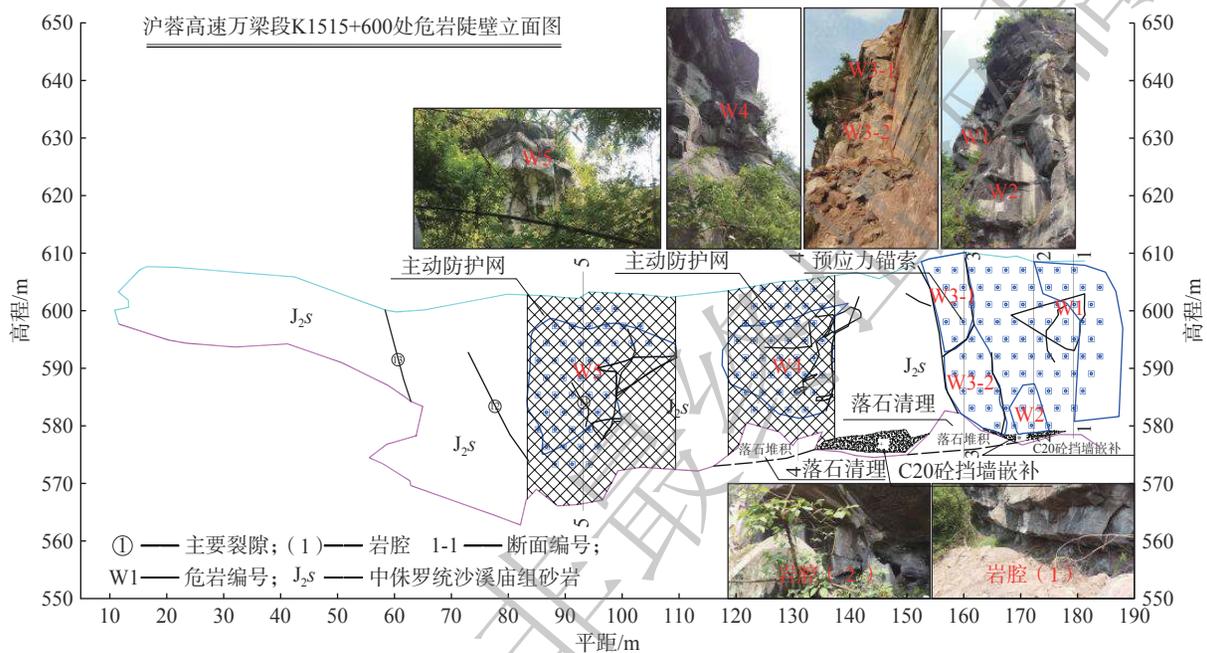


图 3 危岩治理工程立面图

Fig. 3 Elevation view of dangerous rock remediation project

4.3 治理工程效果

采用笔者提出的治理思路和具体治理措施, K1515 段高陡岩壁治理过程中危岩裂隙未加剧发展, 未引发次生病害, 确保了安全文明的施工条件; 治理工程实施后, 再未发生崩塌变形, 岩体整体稳定, 且治理成本降低约 120 万元。由此观之, 笔者所总结出的治理思路和措施具有科学性和可行性(图 4)。

5 结论

(1) 根据危岩的分布特征, 采用赤平投影对危岩体的结构面组合特征进行了分析, W1、W2 危岩体破坏模式为错断和拉裂式; W3-1 危岩体破坏模式为倾倒式; W3-2 危岩体破坏模式为滑移式; W4 和 W5 危岩体破坏模式为鼓胀式。

(2) 根据危岩的破坏模式, 笔者对危岩体的稳定性进行定量计算和分析, 结果显示: W1、W2 产生错断破

坏的可能性小, 但在暴雨工况下 W1、W2 发生拉裂式破坏的稳定性系数分别为 1.12 和 1.61, 处于基本稳定~稳定状态; 在暴雨工况下 W3-1 发生倾倒式破坏的稳定



图 4 危岩治理竣工图

Fig. 4 Completion diagram of dangerous rock remediation

系数为 0.41, 处于不稳定状态; W3-2 在各工况发生滑移式破坏的稳定性系数均大于 1.35, 处于稳定状态; 在暴雨工况下 W4、W5 发生鼓胀式变形的稳定性系数分别为 1.25、1.15, 均处于基本稳定状; 各块的危岩稳定性与现场调查相吻合。

(3) 结合“降风险、少扰动、稳安全、技术可行”的治理思路, 针对具体高陡危岩体采用“坡脚岩腔砼挡墙嵌补+局部 SNS 主动网防护+预应力锚索防护”的综合治理措施科学可行, 危岩体治理效果好, 能为同类问题提供理论与实际参考。

参考文献(References):

- [1] 陈洪凯. 危岩防治原理 [M]. 北京: 地震出版社, 2006: 1 - 20. [CHEN Hongkai. Principle of dangerous rock prevention and control [M]. Beijing: Seismological Press, 2006: 1 - 20. (in Chinese)]
- [2] 胡厚田. 崩塌与落石 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989. [HU Houtian. Collapse and falling rocks [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989. (in Chinese)]
- [3] 王蓉. 危岩发育机理与工程防治原理研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2003. [WANG Rong. Research on development mechanism and control principle of dangerous rock [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2003. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅, 等. 危岩稳定性分析方法 [J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 278 - 282. [CHEN Hongkai, XIAN Xuefu, TANG Hongmei, et al. Stability analysis method for perilous rock [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 26(2): 278 - 282. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 陈洪凯, 秦鑫. 危岩稳定性分析研究现状及趋势 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(10): 49 - 60. [CHEN Hongkai, QIN Xin. Status quo and trend of unstable rock stability analysis [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(10): 49 - 60. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 徐泽鹏. 九寨沟熊猫海危岩变形破坏特征及治理措施研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020. [XU Zepeng. Study on deformation and failure characteristics of dangerous rocks in the Panda Sea in Jiuzhaigou and its control measures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.]
- [7] 陈洪凯, 欧阳仲春, 廖世荣. 三峡库区危岩综合治理技术及应用 [J]. 地下空间, 2002(2): 97 - 101. [CHEN Hongkai, OUYANG Zhongchun, LIAO Shirong. Complex control of dangerous rock and collapse in Three Gorges Reservoir areas [J]. Underground Space, 2002(2): 97 - 101. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王凯强. 浙江省杭(州)绍(兴)台(州)高速公路大岙溪危岩发育特征及治理措施研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018. [WANG Kaiqiang. Research on developmental characteristics and prevention measures of Daaoxi unstable rock along Hang-Shao-Tai highway in Zhejiang Province [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张永海, 谢武平, 罗忠行, 等. 四川名山白马沟危岩体稳定性评价与落石轨迹分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 37 - 46. [ZHANG Yonghai, XIE Wuping, LUO Zhongxing, et al. Stability evaluation and rockfall trajectory analysis of the Baimagou dangerous rock mass in Mingshan County of Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 37 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李世凯, 彭社琴, 赵其华, 等. 四川省汶川县城区某斜坡危岩体破坏模式及治理 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4): 1 - 6. [LI Shikai, PENG Sheqin, ZHAO Qihua, et al. Failure mode and treatment of a dangerous rockmass in Wenchuan County, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(4): 1 - 6. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘传正. 重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 297 - 304. [LIU Chuazheng. Mechanism analysis on the Jiweishan rockfall disaster happened in Wulong, Chongqing, June 5, 2009 [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 297 - 304. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘培培, 罗飞, 朱信波, 等. 狮子石特大型特高位危岩体的分类及治理措施探讨 [C]. 林芝: 第十三届全国边坡工程技术大会论文集, 2021. [LIU Peipei, LUO Fei, ZHU Xinbo, et al. Discussion on classification and treatment measures of lion rock mass with extra-large and extra-high risk [C]. Linzhi: Proceedings of the 13th National Conference on Slope Engineering Technology, 2021. (in Chinese)]
- [13] 康尘云. 基于倾斜摄影的高位危岩特征获取和稳定性评价——以重庆万州观音山危岩带为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 66 - 75. [KANG Chenyun. Feature acquisition and stability evaluation of high dangerous rock mass based on oblique photography: A case study at Guanyinshan in Wanzhou, Chongqing Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 66 - 75. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘美甲, 王涛, 杜建军, 等. 四川泸定 $M_{6.8}$ 级地震诱发崩塌滑灾快速评估 [J]. 水文地质工程地质, 2023,

- 50(2): 84 - 94. [LIU Meijia, WANG Tao, DU Jianjun, et al. Rapid assessment of landslides and collapses induced by the Sichuan Luding Ms6.8 earthquake [J]. Hydrogeological & Engineering Geology, 2023, 50 (2): 84 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 贺凯,殷跃平,冯振,等.重庆南川甄子岩-二坝岩危岩带特征及其稳定性分析 [J].中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 16 - 22. [HE Kai, YIN Yueping, FENG Zhen, et al. Analysis of characteristics and stability for Zengziyan-Eryayan unstable rocks belt in Nanchuan County Chongqing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 16 - 22. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈洪凯,唐红梅,王蓉.三峡库区危岩稳定性计算方法及应用 [J].岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 614 - 619. [CHEN Hongkai, TANG Hongmei, WANG Rong. Calculation method of stability for unstable rock and application to the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 614 - 619. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 冯振,路璐,张长敏,等.降雨诱发山区公路边坡危岩崩塌机理研究 [J].防灾减灾学报, 2021, 37(4): 1 - 8. [FENG Zhen, LU Lu, ZHANG Changmin, et al. Mechanism of rock collapse due to rainfall from roadside slope in mountainous area [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2021, 37(4): 1 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 胡鹏飞.西(乡)—镇(巴)高速公路危岩工程地质分析及治理设计 [J].中外公路, 2021, 41(增刊2): 1 - 5. [HU Pengfei. Engineering geological analysis and treatment design of dangerous rock on Xi (Xiang)-Zhen (Ba) expressway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(Sup 2): 1 - 5. (in Chinese)]
- [19] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册(第五版) [M].北京:中国建筑工业出版社, 2018: 676 - 681. [Editorial Committee of the Engineering Geology Handbook. Engineering geology handbook (Fifth Edition) [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018: 676 - 681. (in Chinese)]